干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.05.05

# 毛乌素沙地风沙土粒径分布特征及其影响因素[①]

王　陇[1,2]，　高广磊[1,2]，　张　英[1]，　丁国栋[1,2]，　赵媛媛[1,2]，　彭　功[1,2]

（1　北京林业大学水土保持学院水土保持国家林业局重点实验室,北京　100083;
2　宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站,宁夏　盐池　751500）

**摘　要:** 为揭示毛乌素沙地风沙土粒径分布特征,推测其影响因素,以毛乌素沙地流动、半固定和固定沙丘风沙土为研究对象,利用激光衍射技术分析其粒度组成,并计算粒度参数,解析粒配曲线,研究结果表明:(1) 毛乌素沙地风沙土优势粒径组为细砂,其平均体积含量约为29.89%～32.46%,不同类型沙丘无显著差异($P>0.05$);少数粒径组分为粗砂、黏粒和极粗砂,其中流动沙丘与半固定、固定沙丘黏粒与粗砂含量均无显著差异($P>0.05$),从半固定到固定沙丘,黏粒含量显著增加($P<0.05$),粗砂含量显著减小($P<0.05$),从流动沙丘到固定沙丘,极粗砂含量显著减小($P<0.05$)。(2) 毛乌素沙地风沙土平均粒径为3.35 $\Phi$,粒度分布集中,分选性较差,偏度状况为正偏,尖窄峰态。在沙丘固定的过程中,平均粒径与标准偏差无显著变化($P>0.05$),峰态显著变宽平($P<0.05$),半固定沙丘偏态值与其他2种沙丘相比显著偏负($P<0.05$)。(3) 流动、半固定与固定沙丘跃移组分的粒径区间分别为44～435 μm、63～500 μm和31～354 μm,风沙运动在半固定沙丘中最为强烈。毛乌素沙地风沙土优势粒径组分含量主要受物源影响,少数粒径组分含量主要受沙丘流动性影响,风沙运动强度随沙丘的固定呈先增大后减小的规律。

**关 键 词:**　粒径分布; 粒度参数; 风沙运动; 粒配曲线; 毛乌素沙地

土壤粒径分布是指土壤固相中不同粒级土壤颗粒所占的比例[1],其不仅能够表征土壤质地、肥力等结构与功能特征,还能够有效指示环境及其变化[2]。风沙土是风蚀荒漠化地区重要的非地带性土壤类型之一,分布面积广大。风沙土的粒径分布不仅是影响地表风蚀、搬运、堆积过程的重要因子,还能够间接反映风蚀沉积环境及其分选作用,是沙丘形成演化过程中风沙活动的重要记录[3-4]。因此,风沙土粒径分布特征研究一直是荒漠生态学领域的重点和热点内容之一。

沙丘是组成沙漠(地)生态系统的基本地貌单元。受气候、植被和地形地貌等因素的影响,不同沉积环境下沙丘风沙运动特征存在显著差异[5-6]。自20世纪80年代以来,许多学者通过大量的野外观测实验,发现沉积环境可显著影响近地表输沙率、蚀积量以及风速廓线[7-9]。但上述研究实验过程难以控制变量,且耗时耗力,缺乏对风蚀物的微观研究。近年来,随着激光衍射技术在土壤粒度分析中的广泛应用,关于风蚀荒漠化地区环境因子对于沉积物粒度组成及其空间分异规律影响的研究逐渐增多[10-12]。相关研究揭示了不同下垫面风沙沉积物的粒度特征,并划分出相应的环境敏感组分,为反演不同沉积环境风沙运动过程提供了有效的方法[3,13]。但国内外相关领域利用粒径分布特征分析不同流动性沙丘风沙运动规律的研究较少,不同类型沙丘风沙土粒径分布特征差异的风沙物理学过程鲜有讨论,相关研究依然较为薄弱,亟待加强。

毛乌素沙地位于内蒙古、陕西和宁夏三省(区)的交界地带,受自然因素和人类活动影响,毛乌素沙

① **收稿日期:** 2019-01-10;　**修订日期:** 2019-03-29
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31600583);国家重点研发计划课题(2016YFC0500905);中央高校基本科研业务费专项(2015ZCQ-SB-02)
**作者简介:** 王陇(1994-),男,硕士研究生,研究方向土壤风蚀. E-mail:along@bjfu.edu.cn
**通讯作者:** 高广磊(1986-),男,博士,副教授,研究方向土壤风蚀. E-mail:gaoguanglei@bjfu.edu.cn

地流动、半固定和固定沙丘交错分布,对域内风沙土粒度分布特征造成复杂影响。鉴于此,本研究以毛乌素沙地风沙土为研究对象,利用激光衍射技术研究揭示不同类型沙丘风沙土粒径分布特征,以期为深入理解近地表风沙运动过程提供理论支撑,并为我国风蚀荒漠化地区生态恢复与重建提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

毛乌素沙地(37°27.5′~39°22.5′ N,107°20′~11°30′ E)地处黄土高原向鄂尔多斯高原的过度地带,海拔 1 100~1 300 m,总面积 $4.2\times10^4$ $km^2$,是我国的四大沙地之一。该区域属典型的温带大陆性半干旱气候,年均降水量 250~440 mm,多集中于 7~9 月,占全年降水量的 60%~75%,年均潜在蒸散量 1 800~2 500 mm。年均气温 6.0~8.5 ℃,1 月平均气温 −9.5~12 ℃,7 月平均气温 22~24 ℃。盛行风向为西北风,冬春两季风力强劲而且频繁,年平均风速约 4 $m\cdot s^{-1}$,最高风速可达 28 $m\cdot s^{-1}$[14]。地带性与非地带性土壤交错分布,主要的地带性土壤为栗钙土和棕钙土,主要的非地带性土壤为风沙土,风沙土结构疏松,肥力低,保水性差,极易发生土壤风蚀。毛乌素沙地植被具有明显的过渡性特点,70% 以上地区处于典型草原亚带,沙地西部边缘地区则属于荒漠草原亚带[15]。

### 1.2 风沙土样品的采集与分析

2017 年 9 月,在毛乌素沙地所属鄂托克旗、鄂托克前旗、乌审旗、盐池县、靖边县和榆阳区选取 85 个采样点采集风沙土样品(图 1)。为消除地形对土壤性质的影响,本研究选择地形平坦、开阔的沙丘顶部进行采样。每个采样点随机设置 3 个 1.0 m×1.0 m的样方,采集位于植被间的表层 0~5 cm 风沙土,记录采样点地理坐标、沙丘类型等信息。根据植被盖度划沙丘类型:流动沙丘(0~15%)、半固定沙丘(15%~40%)与固定沙丘(40%~100%)。采用英国马尔文公司 MS 2000 型激光粒度分析仪测定土壤粒度组成,该仪器测量范围为 0.02~2 000 μm,重复测量误差在 2% 以内。分散系统选取 Hydro2000MU 全自动湿法进样平台,实验设定 5 次重复,取算数平均值。实验前,先将待测土样过

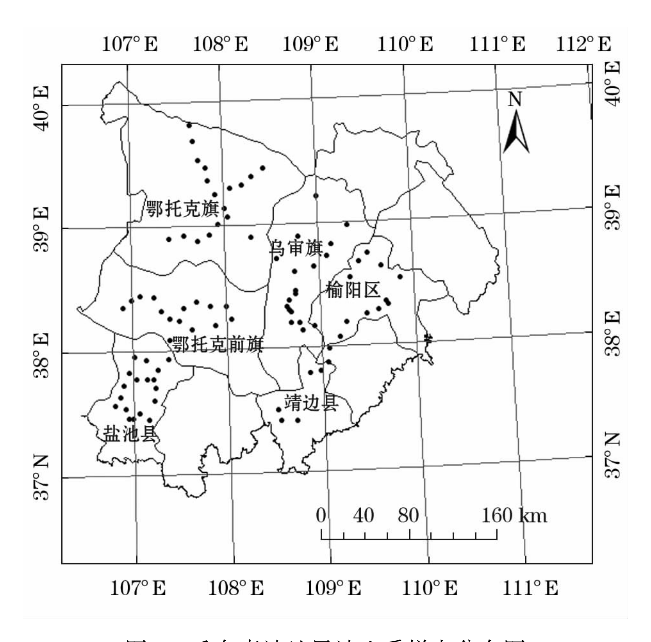



图 1 毛乌素沙地风沙土采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points in the Mu Us Sandy Land

2 mm 土壤筛,去除其中杂质,然后加入质量分数为 30% 的 $H_2O_2$ 溶液除去样品中的有机质,最后加入 NaHMP 溶液作为分散剂,并用超声波震荡 30 s 以破坏团聚体结构。分析结果以美国制土壤粒径标准输出[16]。

### 1.3 风沙土粒度参数计算

根据 KRUMBEIN 对数转化公式 ,将风沙土粒度真值转化为 $\Phi$ 值,式中 $d$ 为沙粒粒径(mm)。基于 KRUMBEIN 和 FOLK[17] 提出的粒度参数计算公式,计算平均粒径 $d_0$、标准偏差 $\sigma_0$、偏度 $S_0$、峰态值 $K_0$ 等粒度参数。其中,平均粒径、标准偏差、偏度和峰态值分别反映风沙土粒度组成的平均状况、分散程度、分配对称性和集中程度[18-20]。

### 1.4 风沙土粒配曲线绘制

粒径频率曲线以粒径区间为横坐标,以区间内粒径百分含量为纵坐标,可反映土壤各粒径组分的含量分布。概率累计曲线以粒径 $\Phi$ 值为横坐标,以小于某一粒径的概率百分数为纵坐标。一般来说,概率累计曲线由若干条斜率不同的线段组成,各线段斜率反映了相应组分颗粒的分选程度,斜率越大,分选程度越好。因此,概率累计曲线可以有效指示沙物质的搬运、沉积状况[21]。

### 1.5 数据处理

用 IBM SPSS Statistic 21 软件对研究区不同类

型沙丘风沙土粒度组成和粒度参数进行单因素方差分析(One-way ANOVO),采用最小显著差异(LSD法)进行差异显著性检验,置信区间为95%。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同类型沙丘风沙土粒度组成

毛乌素沙地风沙土粒度组成的优势组分为细砂,其平均含量可达29.89%～32.46%(表1)。在不同类型沙丘中,细砂含量不存在显著差异($P>0.05$)。粉粒含量区间为20.20%～27.01%,并随着沙丘的固定先减小后增大。其中,流动、半固定与固定沙丘粉粒含量存在显著差异($P<0.05$)。极细砂含量介于18.14%～22.35%之间,从流动沙丘到半固定沙丘,极细砂含量显著减小($P<0.05$),半固定与固定沙丘极细砂含量无显著差异($P>0.05$)。中砂含量范围为14.01%～19.79%。从流动沙丘到半固定沙丘,中砂含量显著增加($P<0.05$),半固定沙丘与固定沙丘中砂含量无显著变化($P>0.05$)。黏粒、粗砂与极粗砂含量相对较少,其含量总和不超过8%。流动沙丘与半固定、固定沙丘黏粒与粗砂含量均无显著差异($P>0.05$),从半固定到固定沙丘,黏粒含量显著增加($P<0.05$),粗砂含量显著减小($P<0.05$)。在沙丘固定过程中,极粗砂含量逐渐减小,其中流动沙丘与固定沙丘粗砂含量差异显著($P<0.05$),半固定沙丘与流动、固定沙丘粗砂含量无显著差异($P>0.05$)。

### 2.2　不同类型沙丘风沙土粒度参数

**2.2.1　平均粒径**　毛乌素沙地风沙土质地较粗,平均粒径为3.35 Φ(表2)。其中流动、半固定与固定沙丘平均粒径分别为3.36、3.30和3.47 Φ,不同类型沙丘风沙土平均粒径无显著差异($P>0.05$)。

**2.2.2　标准偏差**　毛乌素沙地风沙土粒径标准偏差均值为1.66 Φ(表2)。其中,流动、半固定与固定沙丘标准偏差值分别为1.65 Φ、1.63 Φ和1.68 Φ,3种不同类型沙丘标准偏差无显著差异($P>0.05$)。根据分选程度分级标准,毛乌素沙地不同类型沙丘风沙土颗粒分选较差,表明粒径分布比较集中。

**2.2.3　偏度**　毛乌素沙地风沙土偏度值均值为1.32(表2)。在流动、半固定和固定沙地中风沙土颗粒的偏度值分别为0.28、0.24和0.25。其中,半固定沙丘偏度值显著低于流动沙丘和固定沙丘($P<0.05$),流动沙丘与固定沙丘无显著差异($P>0.05$)。半固定沙丘与其他2种类型沙丘相比,偏度向负方向移动。以上结果说明,总体上,毛乌素沙地风沙土颗粒均为正偏度,颗粒分布在粗粒部分更为集中,在细粒部分较为分散,半固定沙丘细粒物质沉积量减少。

表1　毛乌素沙地不同类型沙丘风沙土粒度组成

Tab.1　Volume fraction of different types of aeolian soil particle

| 沙丘类型 | 黏粒 / % 0～2 μm | 粉粒 / % 2～50 μm | 砂粒 / %　50～2 000 μm | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 极细砂 / % 50～100 μm | 细砂 / % 100～250 μm | 中砂 / % 250～500 μm | 粗砂 / % 500～1 000 μm | 极粗砂 / % 1 000～2 000 μm |
| 流动沙丘 | 2.36±1.42ab | 22.60±13.45a | 22.35±10.05a | 32.46±11.52a | 14.01±11.79a | 5.71±7.67ab | 0.51±1.27a |
| 半固定沙丘 | 1.91±1.26a | 20.20±11.82b | 18.14±9.91b | 32.25±11.03a | 19.79±13.42b | 7.35±6.90a | 0.40±0.71ab |
| 固定沙丘 | 2.44±1.59b | 27.01±15.55c | 18.70±9.47b | 29.89±12.12a | 17.57±13.43b | 4.19±4.98b | 0.18±0.40b |
| 均值 | 2.27±1.50 | 24.09±14.58 | 19.36±9.83 | 31.17±11.17 | 17.47±13.51 | 5.34±6.37 | 0.30±0.83 |

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)

表2　不同类型沙丘风沙土粒度参数

Tab.2　Particle size parameters of different types of aeolian soils

| 沙丘类型 | 平均粒径 / Φ | 标准偏差 / Φ | 偏度 | 峰态值 |
|---|---|---|---|---|
| 流动沙丘 | 3.36±0.83*a* | 1.65±0.32*a* | 0.28±0.15*a* | 1.43±0.39*a* |
| 半固定沙丘 | 3.10±0.76*a* | 1.63±0.37*a* | 0.24±0.13*b* | 1.32±0.41*ab* |
| 固定沙丘 | 3.47±0.93*a* | 1.68±0.37*a* | 0.25±0.17*a* | 1.28±0.35*b* |
| 均值 | 3.35±0.88 | 1.66±0.36 | 0.25±0.16 | 1.32±0.38 |

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)

**2.2.4　峰态值**　由表2可知,在毛乌素沙地流动、半固定与固定沙丘风沙土粒径峰态值分别为1.43、1.32与1.28,平均峰态值为1.32,属于尖窄峰态。随着沙丘的固定,风沙土粒径峰态值逐渐降低,且流动沙丘与固定沙丘差异显著($P<0.05$)在沙丘固定的过程中,沙物质粒径频率分布尾部组分颗粒含量

逐渐丰富,粒径分布的峰态逐渐变平缓,集中程度降低。

### 2.3 不同类型沙丘风沙土粒配曲线

毛乌素沙地 3 种不同类型沙丘风沙土粒度分布频率曲线均为双峰(图 2),这表明在 3 种不同类型的沙丘中,由于沙物质的运动和分选作用,产生了不同的搬运方式,沙物质被分了粗细不同的组分,形成了非单一的对数正态规律[21]。3 条曲线均在 4 Φ 和 2 Φ 附近出现了两个波峰,在 3.5 Φ 附近处出现了波谷。在图 2 中,波谷左侧的曲线代表细粒组分(包括黏粒、粉粒),右侧曲线代表粗粒组分(砂粒)。

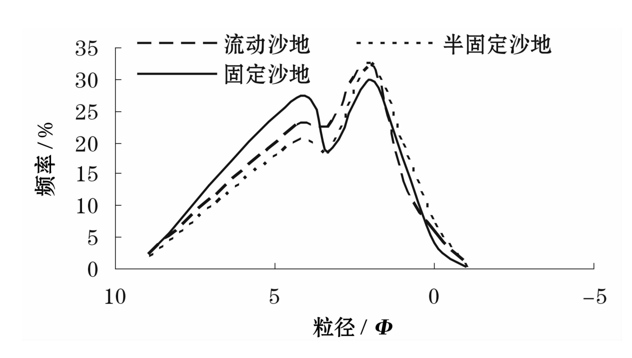



图 2　毛乌素沙地风沙土粒度分布频率曲线

Fig. 2　Particle frequency distribution curves of aeolian soils in the Mu Us Sandy Land

可以看出,在细粒组分,波峰由高到低依次为固定沙丘、流动沙丘和半固定沙丘,表明随着沙丘的固定,风沙土细粒含量先减小后增加,且固定沙丘高于流动沙丘。粗粒组分波峰的由高到低依次为流动沙丘、半固定沙丘和固定沙丘,表明在沙丘的固定过程中,风沙土粗粒含量逐渐减小。

毛乌素沙地风沙土粒径累计概率曲线可分为 3 条斜率明显不同的直线段(图 3)。这是因为沙物质的粒度成分由于搬移方式的不同而分为悬移、跃移、蠕移 3 个粗细不同的组分,其中,细粒段代表悬移组分,中粒段代表跃移组分,粗粒段代表蠕移组分[21]。由曲线节点的位置可知,流动、半固定与固定沙丘跃移组分的粒径区间分别为 1.7 ~ 5.2 Φ(44 ~ 435 μm)、1.5 ~ 4.5 Φ(63 ~ 500 μm)和 1.8 ~ 5.6 Φ(31 ~ 354 μm)。悬移组分的分选程度:固定沙丘 > 流动沙丘 > 半固定沙丘。由各线段的斜率可以看出,跃移组分的分选程度在 3 种样地中都比较高,其中固定沙丘略低于其他两处。蠕移组分的分选性在研究区各样地均较差,其分选性:半固定沙丘 > 流动沙丘 > 固定沙丘。根据以上结果可以看出,风沙运动在半固定沙丘中最为强烈。

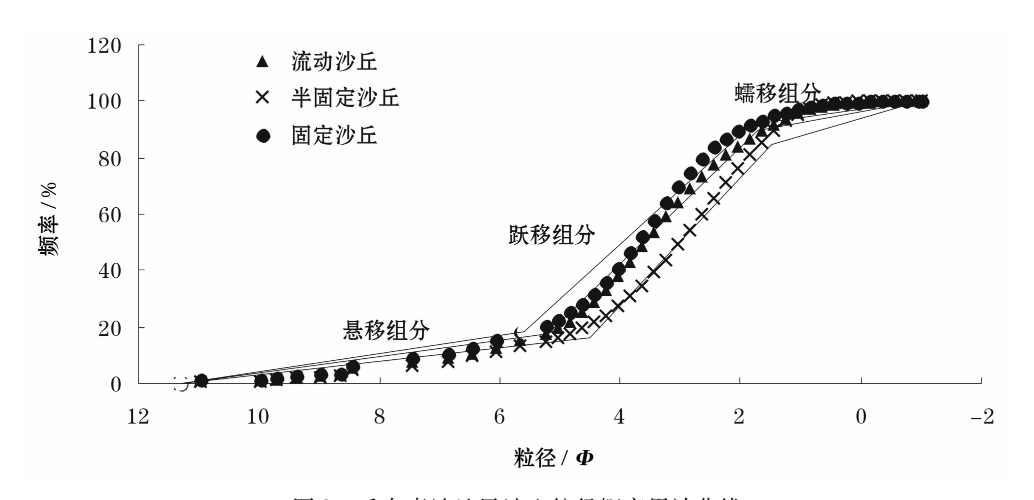



图 3　毛乌素沙地风沙土粒径概率累计曲线

Fig. 3　Probability cumulative curves of aeolian soils in the Mu Us Sandy Land

## 3　讨 论

### 3.1　毛乌素沙地风沙土粒度组成特征及影响因素

**3.1.1　优势组分含量特征及其影响因素**　毛乌素沙地风沙土颗粒优势组分为细砂,少数组分为黏粒,粗砂和极粗砂。随着沙丘逐渐固定,其优势组分含量无显著变化($P > 0.05$),平均粒径与标准偏差亦无显著变化($P > 0.05$)。研究结果与舒培仙等[11]对毛乌素沙地不同类型 41 个现代沙丘的沙粒度研究结果基本一致。这是因为沉积物优势组分主要受

到物源的影响,且主要影响其平均粒径和标准偏差[22]。毛乌素沙地底层埋藏的古风成沙记录显示,在中更新统、晚更新统、全新统,毛乌素地区已被大量的沙物质覆盖,特别是末次盛冰期形成的古风成沙,具有分布广、厚度大、埋藏浅等特征,成为毛乌素沙地现代沙漠化过程的主要沙源[23]。STEVENS[24]采用 U-Pb 同位素定年法以及分裂追踪测年法分析了毛乌素沙地表层土壤矿物元素,发现其主要来源于邻近的古河床沉积物粗颗粒,并且搬运过程中的物质混合弱于远源的细颗粒[25]。因此可以确定,毛乌素沙地优势粒径组分来源于其长期稳定形成的原始地表物质,在短期内不会受到环境的影响而改变。

**3.1.2　少数组分含量特征及其影响因素**　在本研究中,粒度频率曲线的尾部组分(黏粒、粗砂和极粗砂)在沙丘固定过程中变化显著($P<0.05$),其中半固定沙丘黏粒含量出现明显的亏损,其偏度值相比其他两处沙丘显著负偏($P<0.05$)。从流动到固定沙丘,粒径分布的峰度显著变宽平($P<0.05$)。沈亚萍[26]对包括毛乌素沙地在内的中国东部各沙区表层沉积物粒度特征研究亦显示,随着沙丘的固定,其黏粒、粉粒含量均显著减小。有研究显示,沉积环境主要影响粒度频率曲线上尾部的少数组分,其极微弱的改变,都会造成峰度和偏度这两个粒度参数的明显变化[22]。统计学研究表明,分布在众数两边的对称偏斜性对偏度值的影响是有限的,偏度值更多反映的是频率曲线尾部的拉长程度;而峰度则是对频率曲线尾部厚度的度量,尾部越厚,则峰态越尖窄,反之峰态越宽平[27]。因此,从偏度值与峰度值对于沙丘流动性变化的敏感性上可以看出,环境变化是造成毛乌素沙地少数粒径组分侵蚀与沉积的直接原因。

### 3.2　毛乌素沙地风沙运动规律

毛乌素沙地风沙土存在明显悬移、跃移和蠕移组分的划分。研究区流动、半固定与固定沙丘跃移组分范围分别为 44～435、63～500 μm 和 31～354 μm。在风沙区,跃移组分占大多数比例,其粒径范围为 70～500 μm,粒径小于 70 μm 的组分为悬移质[28]。高永等[3]对乌兰布和沙漠沉积物研究发现,粒径介于 1.45～76 μm 的颗粒为悬移质,介于 76～456 μm 之间的颗粒为跃移质。本研究与早期研究结论基本一致。不同类型沙丘颗粒分选组分含量存在变化,是因为地表植被覆盖度和结构的变化,对近地表风速产生了不同程度的阻挡、分解、疏散作用,从而使近地表风速造成不同程度削弱[29]。

在本研究中,近地表风沙运动的削弱程度并不是随着植被覆盖度的增加而增加的。半固定沙丘中风沙运动最为强烈,黏粒含量显著低于流动和固定沙丘($P<0.05$),这是因为干旱风沙区支离破碎的植被覆盖状况对地表风蚀和沉积过程会产生复杂的影响,并不是单纯的线性关系[30]。OKIN 等[31]指出,对于植被对风沙土风蚀的影响的研究,不能单从植被覆盖度去分析,还应考虑植被间隙在整体结构中的作用。有学者在内蒙古半干旱草原的相关研究表明,当植被覆盖度保持在不低于 35% 左右时,才能够有效地保护土壤中的细颗粒[32-33]。在本研究中,流动沙丘植被覆盖度低于 15%,近地表粗糙度较小,来流风速不能得到减弱,气流携沙能力较强,细颗粒易被吹蚀,另外携沙气流中的颗粒经过此处时受的阻碍较小,因此流动沙丘悬移组分的上限较高。风沙运动在半固定风沙土中最为强烈,悬移组分的上限最高,是因为半固定沙丘风沙土的植被覆盖度在 15%～40% 之间,这一覆盖度范围内的植被结构复杂,植被存在一定的间隙,当风从旷野吹至植被间隙时,风速加剧,产生"峡谷效应"[34]。因此,半固定沙丘风沙土中的风沙运动反而较流动沙地中更为强烈,造成黏粒含量更少。由于固定沙丘植被覆盖度均大于 40%,有效减弱了风沙运动,促进了细粒物质的累积,表现在黏粒含量的增加,悬移组分的上限最低,偏度向正方向偏移,峰值减小,变宽平。

## 4　结 论

(1) 毛乌素沙地风沙土优势粒径组分为细砂,平均体积含量为 29.89%～31.17%,不同类型沙丘的细砂含量无显著差异($P>0.05$)。粗砂、黏粒和极粗砂总体积含量不足 8%。从流动沙丘到半固定沙丘,黏粒和粗砂含量均无显著变化($P>0.05$)。从半固定到固定沙丘,黏粒含量显著增加($P<0.05$),粗砂含量显著减小($P<0.05$)。在沙丘固定过程中,极粗砂含量显著减小($P<0.05$)。

(2) 毛乌素沙地风沙土平均粒径为 3.35,标准偏差为 1.66,风沙土颗粒较粗,分选性较差。在沙丘固定过程中其优势组分没有发生显著变化,而物

源则是构成风沙土优势组分的主要原因。偏度为正偏,其中半固定沙丘较其他2种沙丘偏度显著偏负($P<0.05$),其搬运介质动力在3种不同类型沙丘中最强。随着沙丘的固定峰态逐渐变宽平,其中流动沙丘与固定沙丘差异显著($P<0.05$),粒径频率分布曲线尾部组分(即少数组分)随沙丘的固定逐渐增加。

(3)随着沙丘的固定,风沙土细粒含量先减小后增加,风沙运动强度随着沙丘的固定先增大后减小。由于半固定沙丘中植被结构所形成的"峡谷效应",加剧了该地区的风蚀作用,而固定沙丘由于植被覆盖度增加,植被结构得到改善,风蚀得以有效遏制。

## 参考文献(References)


[1] 闵祥宇,李新举,李奇超.机械压实对复垦土壤粒径分布多重分形特征的影响[J].农业工程学报,2017,33(20):274－283.[MIN Xiangyu,LI Xinju,LI Qichao. Influence of mechanical compaction on reclaimed soil particle size distribution multifractal characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(20):274－283.]

[2] CATTLE S R,MCTAINSH G H,ELIAS S. Aeolian dust deposition rates,particle-sizes and contributions to soils along a transect in semi-arid New South Wales,Australia[J]. Sedimentology,2010,56(3):765－783.

[3] 高永,丁延龙,汪季,等.不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J].农业工程学报,2017,33(22):135－142.[GAO Yong,DING Yanlong,WANG Ji,et al. Sediments particle size changes and its sand fixation ability for different shrub dunes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(22):135－142.]

[4] 钱广强,董治宝,罗万银,等.巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J].中国沙漠,2011,31(6):1357－1364.[QIAN Guangqiang,DONG Zhibao,LUO Wanyin,et al. Grain size characteristics and spatial variation of surface sediment in the Badain Jaran Desert[J]. Journal of Desert Research,2011,31(6):1357－1364.]

[5] ZOBECK T M,VAN PELT R S. Wind-induced dust generation and transport mechanics on a bare agricultural field[J]. Journal of Hazardous Materials,2006,132(1):26.

[6] 刘芳,郝玉光,辛智鸣,等.乌兰布和沙区不同下垫面的土壤风蚀特征[J].林业科学,2017,53(3):128－137.[LIU Fang,HAO Yuguang,XIN Zhimin,et al. Characteristics of soil wind erosion under different underlying surface conditions in Ulanbuh Desert[J]. Scientia Silvae Sinicae,2017,53(3):128－137.]

[7] WASSON R J,NANNINGA P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces[J]. Earth Surface Processes & Landforms,1986,11(5):505－514.

[8] WOLFE S A. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress in Physical Geography,1993,17(1):50－68.

[9] 张正偲,董治宝,赵爱国,等.库姆塔格沙漠风沙活动特征[J].干旱区地理,2010,33(6):939－946.[ZHANG Zhengcai,DONG Zhibao,ZHAO Aiguo,et al. Characteristics of blown sand activity in the Kumtagh Desert[J]. Arid Land Geography,2010,33(6):939－946.]

[10] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115－120.[GAO Guanglei,DING Guodong,ZHAO Yuanyuan,et al. Effects of biological soil crusts on soil particle size characteristics in Mu Us Sandland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):115－120.]

[11] 舒培仙,牛东风,李保生,等.毛乌素沙地现代沙丘沙的粒度特征及其意义[J].中国沙漠,2016,36(1):158－166.[SHU Peixian,NIU Dongfeng,LI Baosheng,et al. Grain size characteristics of modern dune sand and its significance in the Mu Us Sandy land,China[J]. Journal of Desert Research,2016,36(1):158－166.]

[12] GAO G L,DING G D,ZHAO Y Y,et al. Characterization of soil particle size distribution with a fractal model in the desertified regions of Northern China[J]. Acta Geophysica,2016,64(1):1－14.

[13] 汪言在.干旱区防沙林带风沙沉积粒径变化及其动力学意义[J].第四纪研究,2013,33(2):376－387.[WANG Yanzai. The particle size changes and its dynamic implication within the shrub barriers of desert highway in arid area[J]. Quaternary Science,2013,33(2):376－387.]

[14] 赵媛媛,丁国栋,高广磊,等.毛乌素沙区沙漠化土地防治区划[J].中国沙漠,2017,37(4):635－643.[ZHAO Yuanyuan,DING Guodong,GAO Guanglei,et al. Regionalization for aeolian desertification control in the Mu Us Sandy land region,China[J]. Journal of Desert Research,2017,37(4):635－643.]

[15] 吴正.中国沙漠及其治理[M].北京:科学出版社,2009:546－553.[WU Zheng. Desert and its improvement in China[M]. Beijing:Science Press,2009.546－553.]

[16] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.四种粒径分级制度对土壤体积分形维数测定的影响[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(6):1060－1068.[GAO Guanglei,DING Guodong,ZHAO Yuanyuan,et al. Effects of soil particle size classification system on calculating volume-based fractal dimension[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2014,22(6):1060－1068.]

[17] FOLK P L,WARD W D. Brazos River Bar:A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research,1957,27(1):3－26.

[18] 杨金玲,李德成,张甘霖,等.土壤颗粒粒径分布质量分形维数和体积分形维数的对比[J].土壤学报,2008,45(3):413－419.[YANG Jinling,LI Decheng,ZHANG Ganlin,et al. Comparison of mass and volume fractal dimensions of soil particle size dis-

tributions[J]. Acta Pedologica Sinica,2008,45(3):413－419. ]

[19] 董智,王丽琴,杨文斌,等. 额济纳盆地戈壁沉积物粒度特征分析[J]. 中国水土保持科学,2013,11(1):32－38. [DONG Zhi, WANG Liqin, YANG Wenbin, et al. Grain size characteristics of Gobi sediment in Ejina Basin[J]. Science of Soil and Water Conservation,2013,11(1):32－38. ]

[20] 任明达. 现代沉积环境概论[M]. 北京:科学出版社,1981:79－82. [REN Mingda. Introduction to modern sedimentary environment[M]. Beijing:Science Press,1981:79－82. ]

[21] 丁国栋. 风沙物理学[M]. 北京:中国林业出版社,2010:47－55. [DING Guongdong. Aeolian physics[M]. Beijing:China Forestry Publishing House,2010:47－55. ]

[22] 金秉福. 粒度分析中偏度系数的影响因素及其意义[J]. 海洋科学,2012,36(2):129－135. [JIN Bingfu. Influencing factors and significance of the skewness coefficient in grain size analysis [J]. Marine Sciences,2012,36(2):129－135. ]

[23] 何彤慧. 毛乌素沙地历史时期环境变化研究[M]. 北京:人民出版社,2010:32－36. [HE Tonghui. The changes of environment in Mu Su Desert in historical times[M]. Beijing:People's Publishing House,2010:32－36. ]

[24] STEVENS T, CARTER A, WATSON T P, et al. Genetic linkage between the Yellow River, the Mu Us Desert and the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Reviews,2013,78(19):355－368.

[25] 赵爽,高福元,贾佳,等. 毛乌素沙地风沙沉积物磁学特征及其古环境意义[J]. 地球物理学报,2015,58(10):3706－3718. [ZHAO Shuang, GAO Fuyuan, JIA Jia, et al. Magnetic properties of eolian sand sediments in the Mu Us Desert and their paleoenvironmental significance[J]. Chinese Journal of Geophysics,2015,58(10):3706－3718. ]

[26] 沈亚萍,张春来,李庆,等. 中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016,36(1):150－157. [SHEN Yaping, ZHANG Chunlai, LI Qing, et al. Grain-size characteristics of surface sediments in the eastern desert regions of China[J]. Journal of Desert Research, 2016,36(1):150－157. ]

[27] 王学民. 偏度和峰度概念的认识误区[J]. 统计与决策,2008,12(17):145－146. [WANG Xuemin. Misunderstanding of the concept of skewness and kurtosis[J]. Statistics & Decision,2008,12(17):145－146. ]

[28] PYE K, ZHOU L P. Late Pleistocene and Holocene aeolian dust deposition in North China and the Northwest Pacific Ocean[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology,1989,73(1):11－23.

[29] 孙悦超,麻硕士,陈智. 保护性耕作农田和柠条带状配置草地防风蚀效果的风洞测试[J]. 农业工程学报,2017,33(11):140－146. [SUN Yuechao, MA Shuoshi, CHEN Zhi. Wind tunnels test on anti-wind erosion effect of conservation tillage farmland and caragana collocated with grassland in strip[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2017,33(11):140－146. ]

[30] MAYAUD J R, BAILEY R M, GILES F S W. A coupled vegetation/sediment-transport model for dryland environments[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface,2017,122(4):148－174.

[31] GREGORY S. OKIN A new model of wind erosion in the presence of vegetation[J]. Journal of Geophysical Research:Earth Surface,2008,113(F2):331－342.

[32] YAN Y C, XIN X P, XU X L, et al. Quantitative effects of wind erosion on the soil texture and soil nutrients under different vegetation coverage in a semiarid steppe of Northern China[J]. Plant & Soil,2013,369(1－2):585－598.

[33] YAN Y C, XIN X P, XU X L, et al. Effect of vegetation coverage on aeolian dust accumulation in a semiarid steppe of Northern China [J]. Catena,2011,87(3):351－356.

[34] 杨文斌,赵爱国,王晶莹,等. 低覆盖度沙蒿群丛的水平配置结构与防风固沙效果研究[J]. 中国沙漠,2006,26(1):108－112. [YANG Wenbin, ZHAO Aiguo, WANG Jinying, et al. Allocation of *Artemisia halodendron* association with low coverage and their sand-fixing and wind-preventing effects[J]. Journal of Desert Research,2006,26(1):108－112. ]

# Particle size distribution of aeolian soils in the Mu Us Sandy Land and the influence factors

WANG Long[1,2], GAO Guang-lei[1,2], ZHANG Ying[1], DING Guo-dong[1,2], ZHAO Yuan-yuan[1,2], PENG Le[1,2]

(1 *Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*; 2 *Yanchi Ecology Research Station of the Mu Us Desert*, *Yanchi* 751500, *Ningxia*, *China*)

**Abstract**: To reveal the characteristic of particle size distribution (PSD) of Aeolian soils and the influence factors at the Mu Us Sandy Land, which is between Shaanxi Province and Inner Mongolia, China, the soil PSD were identified from the mobile, semi-fixed and fixed dunes using laser diffraction technique. Subsequently, soil PSD parameters and curves were calculated including average particle size, standard deviation, skewness, kurtosis and frequency distribution and cumulative curves. The results indicated as follows: (1) fine sand was the dominative group accounting for 29.89% up to 32.46% of the total volume in the Mu Us Sandy Land and there were no significant differences between different types of dunes ($P > 0.05$). Accordingly, coarse sand, clay and extreme coarse sand were much less. For clay and coarse sand, there was no significant difference between mobile, semi-fixed and fixed dunes ($P > 0.05$). However, the content of clay particles was increased significantly and the content of coarse sand was decreased significantly from semi-fixed and fixed dunes ($P < 0.05$). Furthermore, the content of extreme coarse sand was significantly decreased from mobile and fixed dunes ($P < 0.05$). (2) The average particle size was 3.35 Φ in the Mu Us Sandy Land. Soil particle size distributions were centralized, which reflected a poor sorting capability, a very positive skewness and sharp kurtosis. During the sand dune fixation, there was no significant difference in average particle size and standard deviation ($P > 0.05$). Nevertheless, kurtosis became significantly wider ($P < 0.05$). For the semi-fixed dunes, the skewness was inclined to negative if compared with the other two types of dunes. (3) The particle size of the saltation in the mobile, semi-fixed and fixed dunes was 44 – 435, 63 – 500 and 31 – 354 μm, respectively, which indicated strongest Aeolian movement in the semi-fixed dunes. In the Mu Us Sandy Land, the dominative particles were primarily affected by sand source, while the minorities were mainly influenced by the mobility of sand dunes. The intensity of sand transport was growing first and then reducing as the sand dune got fixation. This information from this study will contribute to reveal the sand transport during the sand dune fixation, and provide firm basis for ecological restoration in desertified areas.

**Key words**: particle size distribution; particle size parameter; Aeolian sand transport; particle grading curve; Mu Us Sandy Land